第 41 卷 第 3 期 2023 年 9 月
天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 41, No. 3 Sept., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.06

银河系核球中垂向金属丰度梯度的一种可能的动力学起源机制

刘 仲[1,2]，沈俊太[3,4]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 上海交通大学 物理与天文学院天文系，上海 200240； 4. 教育部粒子天体物理与宇宙学重点实验室，上海 200240)

摘要： 研究发现，即使在银河系长期缓慢演化的过程中，其核球中依然可能存在垂直的金属丰度梯度。该结果反驳了早期研究中认为的银河系核球中长期缓慢演化的过程会消除任何存在的化学丰度梯度的观点。通过使用一个模拟银河系薄盘的多体数值模拟模型得出该研究结果，该模型能自洽地通过盘的棒不稳定性和屈曲不稳定性形成一个盒状/花生状的核球，并结合化学-动力学模型，分析银河系核球中化学成分的演化。

在该演化模型中设定了一个初始的径向金属丰度梯度 (−0.3 dex/kpc)，通过长期缓慢的演化过程，其核球部分呈现出与观测相符的垂直金属丰度梯度。对此一种可能的解释是，星系盘的金属丰度分布在长期缓慢演化的过程中经历了“两步”演化过程，首先盘星系初始半径较大的贫金属粒子在径向混合的过程中产生了更大的径向速度弥散，然后由于核球的屈曲不稳定性演化，垂向速度弥散最终会保持与径向速度弥散的一定比值 (约 0.8)。这个机制导致贫金属粒子在演化过程中能占据更大的垂向范围，从而形成核球的垂直金属丰度梯度。

银河系核球动力学模型通过简单的化学-动力学过程揭示的核球金属丰度演化机制，应在包含更复杂的核球演化机制的模型中同样存在。此外，还通过化学动力学模型讨论了核球观测中存在的争议，如金属丰度分布函数中产生多个“峰”的起源问题，以及该模型构建中存在的一些的不足。

关 键 词： 银河系；银河系核球；银河系演化；银河系丰度

中图分类号： P156　　**文献标识码：** A

收稿日期： 2022-08-07； **修回日期：** 2022-11-29

资助项目： 国家自然科学基金 (12025302, 11773052, 11761131016)；国家重点研发计划 (2018YFA0404501)；中国空间站望远镜项目

通讯作者： 沈俊太，jtshen@sjtu.edu.cn

1 引 言

近年来，银河系中心核球的观测和研究有助于我们理解银河系的形成和演化过程。观测中发现的银河系中心结构分布和运动学特性主要包括形态上不对称的平行四边形[1]、运动学上的柱状旋转[2]，以及核球恒星分布的 X 型特征[3, 4]等。这些证据揭示了银河系的核球起源于星系盘结构本身的长期动力学演化。利用数值模拟的银河系模型，许多工作能够还原出银河系核球的盒状/花生状结构从星系盘中形成的过程，并且其关于动力学和形态学的结果也能较好地匹配银河系核球的观测结果[5, 6]。2010 年，Shen 等人[5]提出银河系核球模型，在模拟银河系核球更细致的结构时，发现银河系中心并不包含一个显著的经典核球 (classical bulge)。这意味着，银河系更接近于一个纯粹由星系盘通过自身的长期缓慢演化形成的星系[7]。

不过也存在一些否认银河系长期演化图景的观点，如在银河系核球中观测到的垂直于盘平面的金属丰度梯度，即随着银纬增加核球区平均金属丰度下降的现象。由于银河系长期动力学演化总是涉及到棒状不稳定性和屈曲不稳定性演化的强烈动力学混合过程，不少天文学家认为这种演化不太可能形成一个有序的化学丰度梯度[8, 9]。为了解决这个问题，需要在银河系的动力学长期缓慢演化的图景中加入化学丰度的分布情况，通过化学-动力学模型的构建来理解银河系核球中的垂向金属丰度分布的形成和演化过程。

Bekki 和 Tsujimoto[10]发现，在其银河系演化模型中，当给予初始盘核球半径范围 (约 2 kpc) 内的径向和垂向金属丰度梯度的分布后，确实出现了演化后形成的核球中垂向金属梯度较平的情况。随后 Martinez-Valpuesta 和 Gerhard[11]指出，要实现符合观测中的银河系垂向金属丰度梯度的分布，初始星系盘所有涉及到棒/核球形成的范围内 (即棒共转半径以内，约 4.5 kpc) 都要存在一定的金属丰度梯度。运用这个方法，他们的模型成功地再现了银河系中心核球的垂向金属丰度梯度。对此，他们的解释是，由于银河系动力学演化中的雅克比能量 ($E_J = E - \Omega_p L_z$) 近似守恒，尽管存在强烈的动力学混合过程，但这些不稳定过程并不会改变贫富金属恒星的雅克比能量的相对分布。这会导致初始位于外围的贫金属恒星在混合过程中仍然优先占据核球外围的区域，而靠近盘面的部分仍然由初始位于中心富金属恒星主导，从而在观测上显示出垂向的金属丰度梯度。这种解释并没有得到广泛的认同，其中存在的问题之一是，在银河系核球形成的过程中，随棒共转的引力势场 (Ω_p) 不能保持较稳定的状态，也就不满足雅克比能量近似守恒的条件。因此，我们认为这种观点不足以解释银河系核球垂向金属丰度梯度形成中最根本的机制。

对银河系核球中垂向金属丰度梯度形成的另一种解释，由 Bekki 和 Tsujimoto[10]最先提出，即银河系核球并非由单个星系盘形成，而是由多个具有不同金属丰度分布的星系盘 (薄盘、厚盘) 共同经过长期缓慢演化而来。由于薄盘、厚盘的形成和演化历史不同，厚盘的恒星平均金属丰度较低且较为年老，垂向速度弥散更大，薄盘的恒星更年轻但平均金属丰度较高，垂向速度弥散较小，两者共同演化形成的核球结构中厚盘恒星相比薄盘恒星整体上占据更大的垂直空间范围，从而产生垂向的金属丰度梯度。Fragkoudi 等人[12]及 Di Matteo 等

人[6]也利用类似的具有多盘结构的多体模拟模型来解释核球的垂向金属丰度梯度的形成。这种观点很重要的一个观测证据是银河系核球的金属丰度分布直方图在贫富金属区域存在多个峰值，这意味着在核球中可能存在多个星族的共同演化，而这些星族成分极有可能来自薄盘和厚盘。

Debattista 等人[13]分析了一种不同的多盘模型，他们认为初始的径向速度弥散才是产生不同金属丰度不同空间分层的主要因素，并假设不同盘的初始垂向速度弥散是相同的。在他们的多体模拟中，使用了五个叠加的星系盘模型，且初始径向速度弥散随着金属丰度的增加而减小 (同一星系盘的所有恒星有固定的金属丰度)。这些星系盘共同演化形成的结果是，初始径向速度弥散更大的贫金属盘在演化中呈现出更大的垂直空间范围，而初始径向速度弥散较小的富金属盘更倾向于占据盘面附近的空间。这表明除垂向速度弥散外，星系盘的径向速度弥散在金属丰度分布演化中可能占据重要地位，甚至是主导作用。

径向金属丰度梯度如何在长期缓慢演化模型中形成垂向金属丰度梯度？以及径向和垂向速度弥散在金属丰度演化中起到什么样的作用？围绕这两个关键问题，我们在前人研究的基础上提出了一种关于银河系核球中垂向金属丰度梯度的动力学起源更为合理的解释。我们首先利用一个简单的银河系核球的化学-动力学模型来重现银河系核球的垂向金属丰度梯度 (第 2 章)，并描绘出模型中金属丰度在核球中的整体分布情况 (第 3 章)。以此为基础，我们通过化学- 动力学的分析来说明核球中垂向金属丰度梯度的形成过程，解释长期缓慢演化图景中的不稳定性过程是如何形成这种较为有序的特征的 (第 4 章)。另外，我们还将讨论这一模型所包含的创新意义和可能存在的不足 (第 5 章)。

2　化学-动力学模型

本工作使用 Shen 等人[5]建立的多体数值模拟模型。在这个银河系核球的动力学模型中，包含 1×10^6 个模拟粒子的星系盘 (标高标长分别为 0.2 kpc 和 1.9 kpc) 通过非常简洁的动力学长期缓慢演化过程，即星系棒的不稳定性形成和核球的屈曲不稳定性过程，产生了能够很好地匹配 BRAVA 巡天[2]中关于银河系核球动力学分布的观测结果。这个模型也能很好地将银河系核球中的其他细节结构模拟出来[14]。我们以 Shen 等人的数值模拟模型为基础，并参照了 Martinez-Valpuesta 和 Gerhard 等人[6, 11, 12]使用的化学-动力学建模方法进行了研究，赋予初始状态下的星系盘粒子金属丰度分布，设径向金属丰度作为初始的金属丰度梯度，表示为：

$$[M/H]_R = [M/H]_0 + \alpha_R \times R \quad , \tag{1}$$

其中，$[M/H]$ 为模拟粒子金属丰度，$[M/H]_0$ 为模型中心处的金属丰度分布 (0.6)，α_R 为径向金属丰度梯度 (-0.3)，R 的单位为 kpc。这里使用的初始径向金属丰度梯度是星系演化“由内而外” (inside-out formation) 形成图景的自然结果，且在高红移星系中观测到的星系径向金属丰度梯度所容许的范围 $(-0.15 \sim -0.3)$[15]。此外，考虑到初始星系盘非常薄，初始的垂向金属丰度梯度并不会显著影响演化结果，且观测和理论上也没有初始薄盘存在高

垂向金属丰度梯度的证据。因此我们对模型做了进一步简化，将初始垂向金属丰度梯度设为 0。

由于设模拟粒子在演化过程中的金属丰度值不变，我们的化学-动力学模型中的化学分布的演化完全来自于动力学过程带来的模拟粒子的重新分布。因此，这个模型能直接地回答在模拟星系的长期缓慢演化的不稳定性过程中不同金属丰度的粒子是如何进行混合的，以及核球的垂向金属丰度梯度能否在这个过程中形成的问题。

3 结 果

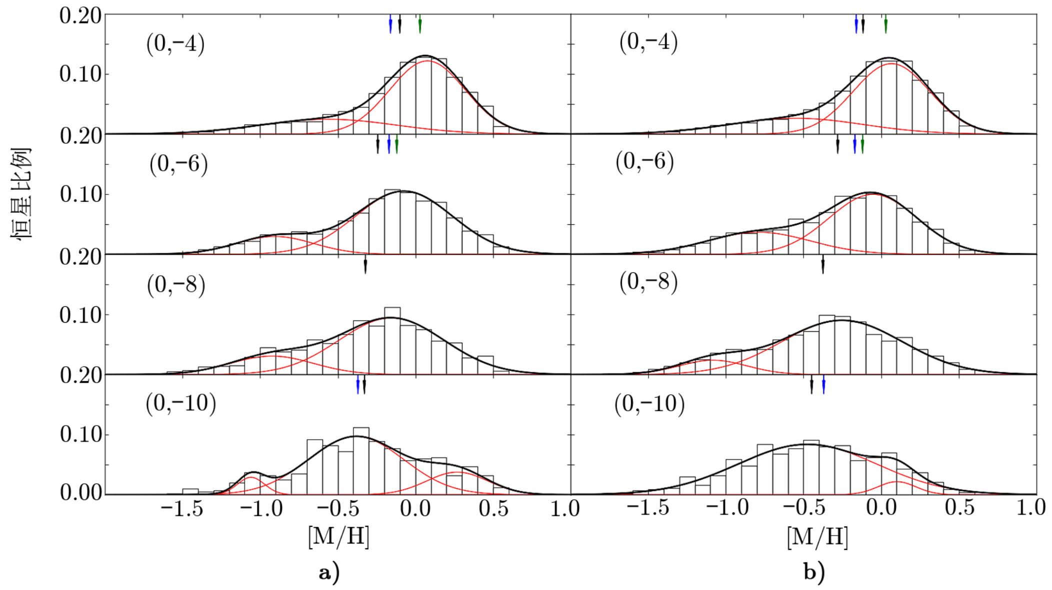
3.1 金属丰度分布直方图

为了去除星系盘前景和背景的盘星粒子对于核球观测的干扰，我们选用距离银心半径在 $R_G < 4.5$ kpc 范围内的粒子。图 1 展示了化学-动力学模型中在核球范围内不同区域的金属丰度分布直方图。在模型中核球区的不同银纬 $b = -4°$、$b = -6°$、$b = -8°$ 及 $b = -10°$ 处，我们用黑色箭头标识出该区域金属丰度分布的平均值。图1 a) 为模型演化时间 2.4 Ga 的结果，对应于核球内部动力学演化已接近完成的时刻；而图1 b) 为演化时间 4.8 Ga 的结果，对应于星系盘在更长期的稳定演化的结果。结果显示在 $-8° < b < -4°$ 范围内，核球沿着短轴方向的垂向金属丰度梯度为 -0.039 dex/(°)，与 Gonzalez 等人[17]在相应区域的观测值 -0.04 dex/(°) 和 Gaia-ESO[16] 的观测值 -0.05 dex/(°) 符合较好。另外，不同演化时刻金属丰度梯度分布的对比也显示出模型所产生的银河系核球中的金属丰度梯度是稳定的，这表明银河系的长期动力学演化中形成垂向金属丰度梯度的主导过程，是核球在形成过程中的不稳定性演化，即棒形成的不稳定性过程和核球形成的屈曲不稳定性演化。

直方图中显示出的另一个特征是其分布的非正态性。前文提到银河系核球被认为可能具有多盘复合演化的形成历史，其重要证据是金属分布直方图在不同金属丰度处存在多个峰值。虽然贫富金属丰度处所呈现出的峰值比例在观测上仍然存在争议[18, 19]，但是均呈现出非正态的直方图分布且整体向富金属端偏移。观测中的这种现象通常被认为是银河系核球具有复杂结构 (薄盘、厚盘、晕) 共同演化的证据[20]。对此，我们采用了 IDL 的 xgaussfit 程序[21]对模型结果的金属丰度分布直方图进行高斯混合模型 (Gaussian mixture model) 分解，并将拟合的高斯曲线绘制在图 1 中。我们单盘的化学-动力学模型不仅能够产生非正态特征的金属丰度直方图，而且产生的贫富金属峰的相对比例也与最新的 Blanco DECam Bulge Survey (BDBS[19]) 巡天观测中的金属丰度分布结果相符合。对于银河系核球中这部分贫金属峰的起源，我们将在第 4.2 节中进行讨论。由于不同观测中金属分布直方图的结果仍然存在一些争议[16, 19, 22]，目前关于银河系核球中是否存在复杂结构共同演化仍然是一个开放性问题，厚盘和晕的部分在核球中的分布可能并不会非常明显。

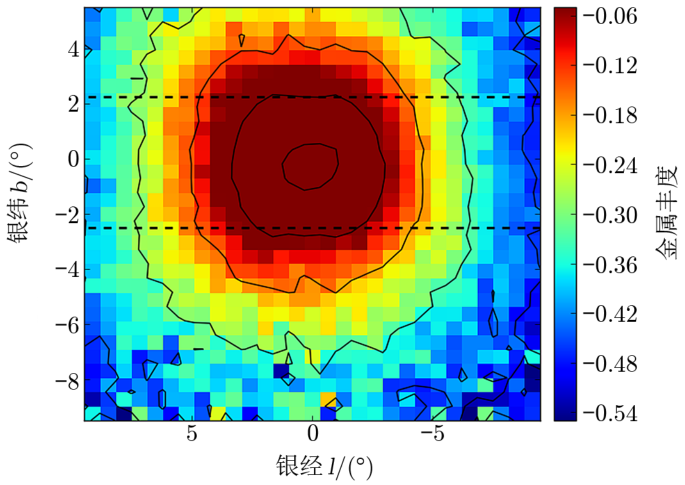
3.2 (l, b)-金属丰度分布图

除了通过金属丰度分布直方图外，我们还描绘了模型中所模拟的银河系核球在银经 (l) 和银纬 (b) 坐标轴上的金属丰度分布 (见图 2)。



注：a) 模型在演化时间为 2.4 Ga 时的分布直方图；b) 模型演化时间为 4.8 Ga 时的分布直方图。黑色箭头标识此区域的平均金属丰度值，而蓝色和绿色箭头分表标识 Gaia-ESO[16] 和 Zoccali 等人[8] 在此区域观测结果的平均值。高斯曲线是采用高斯混合方法 (GMM) 对模拟得到的直方图进行拟合的结果。

图 1　化学-动力学模型对银河系核球金属丰度分布的模拟结果



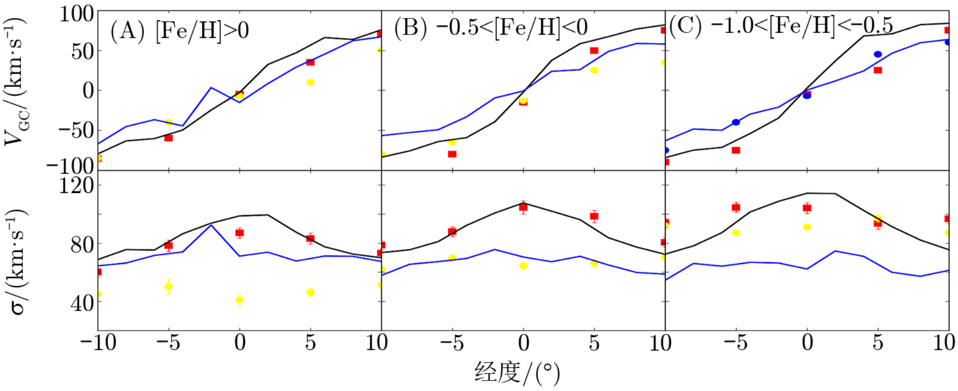
注：两条虚线中间代表银河系核球中容易被尘埃消光而难以观测的部分[17]。

图 2　银河系核球模型模拟的银心方向 $(l,\ b)$ 轴上的金属丰度分布图

为了与观测相比较，我们选取银经在 $-10^\circ < l < 10^\circ$ 且银纬在 $-10^\circ < b < 10^\circ$ 核球范围内，与太阳距离为 $4 \sim 12$ kpc 内的粒子[11, 17]。其中太阳位置设定于与棒主轴夹角 20°，距银心 8.5 kpc 处 (参考文献 [5] 中的图 1)。从结果中可以看到，在我们的化学-动力学模型中几乎在各个方向上都存在一定的金属丰度梯度，且核球的外围由贫金属的模拟粒子占据，而核球的中心部分仍然由富金属丰度的模拟粒子所主导。这个结果与 VVV 观测[17] 中得到的趋势相一致。进一步地，我们还发现 (l, b)-金属丰度分布图中存在金属丰度分布非对称的现象，体现为 $l = 5^\circ$ 处的金属丰度要高于 $l = -5^\circ$ 的相应区域，这在 Gonzalez 等人[17]的观测结果中也有体现。对此，比较合理的解释是银河系棒的倾角导致视觉效应，$l > 0^\circ$ 一端离观测者更近，而 $l < 0^\circ$ 一端离观测者较远，使得其在银经方向展开的角度不同。这些与观测结果相符的特征，说明银河系棒和核球的化学-动力学演化对于研究银河系中心区域的金属丰度分布的演化起到非常重要的作用。

3.3 化学-动力学关系

银河系核球中不同金属丰度的星族动力学特性也是研究其形成演化历史的重要因素。核球中经历星系盘长期缓慢演化的星族应该保留更多的盘状特征，如柱状旋转和较低的随机速度弥散，而由其他动力学演化过程 (如星系并合、恒星形成) 形成的星族则会呈现与之不同的动力学和化学特征，如较高的随机速度弥散。Ness 等人[23]考虑根据金属丰度的不同将核球中的恒星分解为 [Fe/H] > 0 (A)，$-0.5 <$ [Fe/H] < 0 (B) 和 $-1.0 <$ [Fe/H] < -0.5 (C) 三个主要星族和 [Fe/H] < -1.0 的 D 星族。他们发现三个主要星族均呈现出盘状特征的柱状旋转，但在速度弥散的分布上富金属的星族 A 和 B 表现出较强的垂向梯度；而贫金属的星族 C 在垂直方向的变化中，其速度弥散只产生很小的差异。而我们的模拟中，不同金属丰度的星族除了随机速度弥散随着金属丰度降低而升高外，动力学基本特征 (柱状旋转、速度弥散的垂向分布梯度) 并没有显著的区别 (见图 3)。



注：带误差棒的方块和点代表 ARGOS 中的观测结果[23] (红色为 $b = -5^\circ$，黄色为 $b = -10^\circ$)，实线代表模型中在相应区域的模拟结果 (黑色为 $b = -5^\circ$，蓝色为 $b = -10^\circ$)。

图 3　银河系核球化学-动力学模型的不同星族的旋转曲线 (上) 和速度弥散 (下) 分布

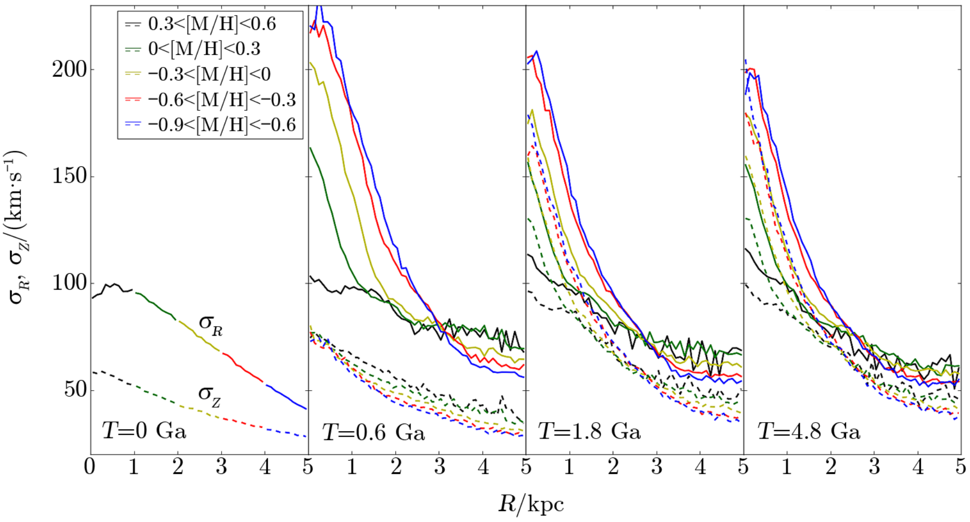
如果贫金属丰度星族的随机速度弥散分布的差异确实显著存在，Ness 等人[23]提出，金属丰度在 $-1.0 < [Fe/H] < -0.5$ 范围内，银河系核球更有可能属于与薄盘具有不同演化历史的厚盘结构。但是，最近 Wylie 等人[24] 采用 Ness 等人的 ARGOS 数据[20]，利用 APOGEE 的观测结果[25] 进行了交叉匹配，发现星族 C $(-1.0 < [Fe/H] < -0.5)$ 的速度弥散分布没有星族 A 和星族 B 的明显。我们认为 Ness 等人[20]所认定的星族 C 属于厚盘起源的观点相应支持的证据并不十分充分，且银河系核球中不同金属丰度的星族可能主要仍然是由薄盘长期缓慢演化而来。

4 讨 论

4.1 核球垂向金属丰度梯度的形成机制

根据之前的分析和讨论，我们知道银河系核球的化学-动力学模型中的垂向金属丰度梯度的形成是源于核球形成过程中的两种不稳定性，且径向和垂向的速度弥散在这个过程中起到非常重要的作用。我们分析不同金属丰度的星族在模型不同演化时刻的径向和垂向速度弥散分布，结果如图 4 所示。它们分别是初始状态的 $T = 0$ 时刻，星系棒结构形成但未开始屈曲不稳定演化的 $T = 0.6$ Ga 时刻，形成核球的屈曲不稳定性演化过程中 ($T = 1.8$ Ga 时刻，接近演化完成)，核球结构演化完成并达到稳定后 ($T = 4.8$ Ga 时刻)。不同于图 3，本章我们采用了更加细致的星族分层，根据金属丰度的不同将参与核球形成的恒星分为 $0.3 \sim 0.6$ dex (初始半径：$0 \sim 1$ kpc), $0 \sim 0.3$ dex (初始半径：$1 \sim 2$ kpc), $-0.3 \sim 0$ dex (初始半径：$2 \sim 3$ kpc)，$-0.6 \sim -0.3$ dex (初始半径：$3 \sim 4$ kpc) 和 $-0.9 \sim -0.6$ dex (初始半径：$4 \sim 5$ kpc) 五个成分，并绘制出其径向和垂向速度弥散的演化。

图 4 a) 显示了模型在初始状态下不同星族的径向速度弥散 σ_R 和垂向速度弥散 σ_Z 在 $R = 5$ kpc 内的分布，分别用不同颜色的实线段和虚线段表示。可以清晰地看到不同半径处的金属丰度和相应的平均速度弥散，随着半径的增加而降低。这是典型的星系盘密度指数分布模型的速度弥散分布特征。图 4 b) 显示星系棒的形成造成了模拟粒子强烈的径向混合，不同星族在垂向速度弥散 σ_Z 几乎不变的同时，径向速度弥散 σ_R 产生显著的变化。此时贫金属星族特别是进入盘中心 2 kpc 范围的部分其径向速度弥散 σ_R 急剧增加，与之相比富金属星族的径向速度弥散 σ_R 几乎没有发生明显的变化。当发生核球形成的屈曲不稳定性演化时 (见图 4 c))，不同星族的径向速度弥散 σ_R 并不发生明显的演化，而垂向速度弥散 σ_Z 显著增加，且这个过程主要发生在中心的核球区域 ($0 \sim 2$ kpc)。核球屈曲不稳定性演化的最终结果是，垂向速度弥散和径向速度弥散的比值 σ_Z/σ_R 会达到一个较为稳定的值[26]。因此，在棒状不稳定性演化中获得了较高的径向速度弥散 σ_R 的贫金属星族，在屈曲不稳定性演化中会获得较高的垂向速度弥散σ_Z，且这意味着这些星族在空间上会占据更大的垂直范围。我们测定的垂向速度弥散与径向速度弥散的比值 σ_Z/σ_R 约为 0.8，这远高于理想薄盘的理论值 $\sigma_Z/\sigma_R \approx 0.3$，但在更接近于实际的星系数值模拟中是比较合理的 (见参考文献 [27])。并且在模型中的核球形成之后的演化过程中，这样的垂向速度弥散与径向速度弥散的比值



a) b) c) d)

注：实线代表径向速度弥散 σ_R，虚线代表垂向速度弥散 σ_Z 的分布情况。从 a)、b)、c)、d) 分别对应于模型演化的不同阶段，分别为模型初始状态 $T = 0$，棒结构形成初期的 $T = 0.6$ Ga，核球屈曲不稳定性演化过程中 $T = 1.8$ Ga，及核球形成后经过长期缓变演化达到 $T = 4.8$ Ga。

图 4 银河系核球的化学-动力学模型的不同星族在不同时刻的动力学参数

σ_Z/σ_R 也将几乎保持稳定 (见图 4 d))，这代表核球的垂向金属丰度梯度也会保持稳定。

我们把银河系核球中金属丰度分布的形成机制总结为“两步”过程。

1) 银河系中棒的不稳定形成过程使部分初始半径较大，金属丰度较低的恒星进入中心区域，并且这部分恒星获得了较大的径向速度弥散 σ_R。

2) 核球形成的屈曲不稳定演化，使得那些获得了较大径向随机速度弥散 σ_R 的贫金属恒星再次获得较大的垂向速度弥散 σ_Z，从而占据更大的垂直空间范围，而核球中径向速度弥散 σ_R 较小的富金属粒子仍然留在中心靠近盘面区域。在这一过程中核球内形成了垂向的金属丰度梯度。

因此，在银河系核球的垂向金属丰度梯度的形成中，Debattista 等人[13]讨论的径向速度弥散与 Bekki 和 Tsujimoto[10]所讨论的垂向速度弥散均在演化中起到重要作用，并且两者通过核球演化形成的相对固定的比值相联系。核球中垂向速度弥散与径向速度弥散的比值 σ_Z/σ_R 说明星系盘的内部演化在影响各星族径向速度弥散分布的同时，也会影响其最终的径向速度弥散的分布。我们认为，这种化学-动力学演化机制应当也存在于其他的银河系长期缓慢演化的化学-动力学模型中。

4.2 银河系核球中贫金属部分的另一种起源

银河系的核球具有非常复杂的结构[19, 20, 28]。银河系核球中的富金属恒星 ([Fe/H] $>$ -0.5) 起源于银河系的薄盘的长期缓慢演化是目前被普遍接受的观点。而核球贫金属部分 ([Fe/H] < -0.5) 的起源却有着很多不同的观点，包括具有不同于薄盘演化历史的厚盘[10]、

并合形成的“经典核球”[29]以及向内延伸的晕[30]等在内的很多成分，均可能以某种方式与核球的贫金属部分相关联。我们的模型则认为，银河系星系盘的不稳定性演化使得其初始金属丰度分布产生大规模的重新分布，而相当一部分的核球贫金属星仍然起源于薄盘，与核球中的富金属部分相同。根据我们计算的结果，在银纬 $b = -8^\circ$ 附近来自于薄盘贫金属恒星 ([Fe/H] < -0.5) 的贡献可以达到 15%，这一比例在银河系核球的贫金属丰度恒星起源的研究中是不可忽视的。因此我们提出的银河系核球的金属丰度演化图景，为银河系核球中贫金属丰度恒星的起源提供了一种新的研究角度。

5 总　结

通过银河系核球数值模拟模型的化学-动力学建模，我们提出了一种可能的银河系核球中金属丰度垂向梯度的形成机制。我们的研究结果总结为以下四点。

1) 银河系长期缓慢演化中的不稳定性过程并不会使不同金属丰度的恒星完全随机地混合，且可以形成与观测相符合的核球中的垂向金属丰度梯度。

2) 我们提出了一个“两步”的核球化学丰度的演化过程，用以解释银河系核球中垂向金属丰度梯度的形成。并且详细分析了参与核球演化的不同星族的径向速度弥散 σ_R 和垂向速度弥散 σ_Z 及其比值在演化中的重要作用。

3) 银河系核球中金属丰度范围为 [Fe/H] < -0.5 的贫金属恒星，除了可能的厚盘、晕星等的贡献外，薄盘自身也是重要的来源，其贡献在银纬 $b = -8^\circ$ 附近可达到 15%。

4) 银河系核球的金属丰度分布直方图中的多峰结构，可能是由单个具有一定金属丰度分布的星系盘通过复杂的动力学演化产生，而不一定对应于多个不同演化历史的星系盘。

我们提出的银河系核球的化学动力学模型也存在一些局限性，如为了在核球中产生与观测相符的垂向金属丰度梯度，需要假设初始盘存在初始径向金属丰度梯度。但是关于银河系早期金属丰度的分布情况，目前还缺乏被广泛认可的结论。另外，在模型产生的核球金属丰度分布的细节上，也存在一些难以解释的地方，如贫金属丰度的核球粒子缺乏 X 型结构的问题[23]，以及 APOGEE 观测中发现的核球中靠近盘面处的正径向金属丰度梯度的形成[31]。为了突出动力学演化的影响，我们采用了相对简单的建模方法，确实存在与观测难以完全符合的可能。这需要我们在未来的工作中对这部分建模工作进一步地优化，如对初始化学模型分布的优化以及数值模拟模型中加入暗晕粒子等。另外，这种银河系核球的“两步”演化过程在其他银河系长期缓慢演化模型中也应该存在，我们同样可以把该分析方法应用到更复杂的银河系核球的形成和演化模型中，以得到更加合理的结论。

参考文献：

[1] Weiland J L, Arendt R G, Berriman G B, et al. ApJ, 1994, 425: L81
[2] Howard C D, Rich R M, Reitzel D B, et al. ApJ, 2008, 688(2): 1060
[3] McWilliam A, Zoccali M. ApJ, 2010, 724(2): 1491
[4] Nataf D M, Udalski A, Gould A, et al. ApJ, 2010, 721(1): L28
[5] Shen J, Rich R M, Kormendy J, et al. ApJ, 2010, 720(1): L72
[6] Di Matteo P, Gómez A, Haywood M, et al. A&A, 2015, 577: A1
[7] Kormendy J. arXiv: Cosmology and Nongalactic Astrophysics, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119207662, 2013
[8] Zoccali M, Hill V, Lecureur A, et al. A&A, 2008, 486(1): 177
[9] Babusiaux C, Gómez A, Hill V, et al. A&A, 2010, 519: A77
[10] Bekki K, Tsujimoto T. MNRAS, 2011, 416(1): L60
[11] Martinez-Valpuesta I, Gerhard O. ApJ, 2013, 766(1): L3
[12] Fragkoudi F, Di Matteo P, Haywood M, et al. A&A, 2017, 607: L4
[13] Debattista V P, Ness M, Gonzalez O A, et al. MNRAS, 2017, 469(2): 1587
[14] Li Z Y, Shen J. ApJ, 2012, 757(1): L7
[15] Curti M, Maiolino R, Cirasuolo M, et al. MNRAS, 2020, 492(1): 821
[16] Rojas-Arriagada A, Recio-Blanco A, de Laverny P, et al. A&A, 2017, 601: A140
[17] Gonzalez O A, Rejkuba M, Zoccali M, et al. A&A, 2013, 552: A110
[18] Barbuy B, Chiappini C, Gerhard O. ARA&A, 2018, 56: 223
[19] Johnson C I, Rich R M, Young M D, et al. MNRAS, 2020, 499(2): 2357
[20] Ness M, Freeman K, Athanassoula E, et al. MNRAS, 2013, 430(2): 836
[21] Lindler D. FUSE IDL Tools Reference Handbook, Version 1.1. Baltimore, MD: Johns Hopkins University, 2001
[22] Zoccali M, Vasquez S, Gonzalez O A, et al. A&A, 2017, 599: A12
[23] Ness M, Freeman K, Athanassoula E, et al. MNRAS, 2013, 432(3): 2092
[24] Wylie S M, Gerhard O E, Ness M K, et al. A&A, 2021, 653: A143
[25] Majewski S R, Schiavon R P, Frinchaboy P M, et al. AJ, 2017, 154(3): 94
[26] Merritt D, Sellwood J A. ApJ, 1994, 425: 551
[27] Łokas E L. A&A, 2019, 629: A52
[28] Kunder A, Pérez-Villegas A, Rich R M, et al. AJ, 2020, 159(6): 270
[29] Saha K, Martinez-Valpuesta I, Gerhard O. MNRAS, 2012, 421(1): 333
[30] Pérez-Villegas A, Portail M, Gerhard O. MNRAS, 2017, 464(1): L80
[31] Fragkoudi F, Di Matteo P, Haywood M, et al. A&A, 2017, 606: A47

A Possible Dynamical Origin of the Vertical Metallicity Gradient in the Milky Way Bulge

LIU Zhong[1,2], SHEN Jun-tai[3,4]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Astronomy, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Key Laboratory for Particle Astrophysics and Cosmology (MOE) / Shanghai Key Laboratory for Particle Physics and Cosmology, Shanghai 200240, China)

Abstract: Observations show a clear vertical metallicity gradient in the Galactic bulge. It is often regarded as a counter-argument against the ‘secular evolution’ of the Milky Way bulge, as the strong mixing of the internal instabilities in the secular evolution may erase the pre-existing vertical chemical gradient. Inspired by some previous work, we use a thin disk model that self-consistently forms a boxy/peanut bulge via the bar and buckling instabilities, to explore the origin of this chemical gradient. We find the vertical gradient can be established if the initial disk is set up with a radial metallicity gradient, as in the evolution the metal-poor particles in the outer region move inward and get more vertically thickened than the inner metal-rich particles. This is because the formation of the bar always tend to heat the in-plane random motions (σ_R) of the metal-poor population at larger radius more, therefore when the σ_Z/σ_R of all populations finally reach a similar value about 0.8 in the buckling instabilities, the vertical random motion (σ_Z) of metal-poor population is also more heated. This formation mechanism revealed by our simplest secular evolution disk model must also be in action in other more complicated disk models that experienced similar internal instabilities. Our chemo-dynamical model can produce the multiple “peaks” in the metallicity distribution functions found in many recent bulge observations. We also discuss other implications and the weaknesses of this model.

Key words: Galaxy; Galaxy bulge; Galaxy evolution; Galaxy abundance